

УДК 631.363.7

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409

## Підвищення ефективності процесу потокового змішування сипких компонентів

І. А. Шевченко, Е. Б. Алієв

*Сучасна промислова і аграрна переробка майже завжди передбачає виконання процесу змішування сипкого матеріалу на різноманітному обладнанні. На даний момент відомі змішувачі різноманітних конструкцій, принципів та способів реалізації технологічного процесу. Серед існуючих способів змішування є потоковий спосіб, який має значні переваги – зменшення енергоємності при підвищенні якості процесу безперервного приготування та роздавання суміші. Однак дослідженню потокового способу змішування сипких матеріалів приділено мало уваги. Це не дає можливості використати відомі аналітичні моделі процесу переміщення сипких компонентів для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів робочих органів змішувача потокового типу.*

*В результаті аналітичних досліджень потокового способу змішування складено систему диференціальних рівнянь руху частинок компонентів сипкого матеріалу в повітряному потоці під дією поверхонь робочих органів розробленого змішувача. Представлена система диференціальних рівняння покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу в пакеті програмного забезпечення StarCCM+(США).*

*В результаті чисельного моделювання отримані залежності динаміки зміни концентрації компонентів в суміші та однорідності суміші від зон змішувача потокового типу в залежності від факторів досліджень (частота обертів, кута атаки лопатевого змішувача, продуктивність подачі першого і другого компонентів).*

*Для процесу змішування двокомпонентної кормової суміші (стебловий і концентрований корми) визначені оптимальні конструктивно-технологічні параметри змішувача потокового типу, при яких однорідність отриманої кормосуміші є максимальною.*

*Ключові слова: сипкий матеріал, потокове змішування, чисельне моделювання, робочий орган, конструктивно-технологічні параметри.*

### 1. Вступ

У промисловій і аграрній інженерії процес змішування представляє собою комплекс операцій, який включає маніпуляцію гетерогенною фізичною системою з метою зробити її більш однорідною [1]. Сучасна промислова і аграрна переробка майже завжди передбачає виконання процесу змішування на різноманітному обладнанні. Тип операцій та обладнання, що використовуються під час змішування, залежить від стану змішаних матеріалів (газ, рідина, сипкий матеріал або їх комбінації).

Сипкий матеріал – це конгломерат дискретного твердого тіла, макроскопічних частинок, що характеризуються втратою енергії під час взаємодії [2]. Компоненти, що складають сипкий матеріал, повинні бути достатньо великими, щоб вони не піддавалися тепловому коливальному руху.

Оскільки потік сипкого матеріалу характеризується локальною дисипацією, досі немає задовільної теорії. Більшість теорій отримують з локальної рівноваги та моделювання, використовуючи припущення про континуум [3–6]. Однак при цьому контактна взаємодія між частинками не враховується, що приводить до математичного опису процесів змішування в першому наближенні.

Тому актуальним є розробка аналітичної моделі процесу змішування потоків сипких компонентів на основі чисельного моделювання із врахуванням контактної взаємодії між частинками та поверхнею робочих органів змішувачів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

На даний момент відомі змішувачі різноманітних конструкцій, принципів та способів реалізації технологічного процесу. Як зазначено в роботі [7], в основному всі змішувачі можна розділити на дві великі групи: циклічної і безперервної дії. В роботі [8] наведено результати досліджень змішувачів безперервної дії, які є більш ефективними під час приготування великих об'ємів суміші і одночасним транспортування і вивантаженням до наступної технологічної операції. При цьому кінетика формування багатокомпонентних сумішей різноманітних сипких матеріалів представлена в дослідженні [9]. Однак отримані моделі призначені лише для оцінки структурованості компонентів у суміші.

Конструкції більшості обладнання для змішування зводиться до ємності, в якій встановлюється робочий орган, що обертається (наприклад, гвинт, лопаті спіралі тощо) [10]. Також застосовуються конструкції барабанного типу, де обертається безпосередньо сама ємність [11]. Як зазначено в [12, 13], обидва типи конструкцій змішувачів є досить енерговитратним при досягненні необхідної якості, так як змішування сипких компонентів відбувається у великих об'ємах.

Альтернативою зазначених способів змішування є потоковий спосіб, який має значні переваги, – зменшення енергоємності при підвищенні якості процесу безперервного приготування та роздавання суміші. Існуючі технічні засоби [14] призначені для цього, базуються на порційному змішуванні двох зустрічних потоків сипкого матеріалу, що дозволяє рівномірно перерозподілити компоненти матеріалу в невеликому об'ємі.

Як показав аналіз літературних джерел [15, 16], дослідженню процесу переміщення сипких компонентів під дією повітряного потоку присвячено багато теорій та методик розрахунку координатних положень частинок. В основу цих досліджень покладено фізико-математичний апарат переміщення матеріальної точки під дією різноманітних сил, що не враховує взаємодію частинок між собою, які мають випадкове початкове положення. Як зазначено в [16], задача взаємодію потоку сипких компонентів з повітряним потоком відноситься до класичної задачі газодинаміки двофазних потоків.

Також широке поширення отримала дифузійна модель процесу змішування сипких компонентів [7], яка описується диференціальним рівнянням зміни концентрації ключового компонента в суміші. Недоліком даної моделі є те, що її можна застосовувати лише для двокомпонентних сумішей при змішуванні великих об'ємів. Тобто для потокового способу змішування вона не підходить.

Проведений аналіз свідчить, що дослідженню потокового способу змішування сипких компонентів приділено мало уваги. Це не дає можливості використати відомі аналітичні моделі процесу переміщення сипких компонентів для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів робочих органів змішувача потокового типу. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення досліджень, які присвячені розробці фізико-математичної моделі процесу потокового змішування сипких компонентів.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу змішування сипких компонентів шляхом застосування змішувача потокового типу із обґрунтованими режимно-технологічними параметрами.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- запропонувати еквівалентну схему змішувача потокового типу сипких компонентів;
- розробити аналітичну модель процесу переміщення сипких компонентів під дією повітряного потоку і поверхонь робочих органів змішувача потокового типу;
- провести чисельне моделювання процесу роботи змішувача потокового типу та визначити його раціональні режимно-технологічні параметрами.

### **4. Матеріали і методи досліджень**

Обґрунтування еквівалентної схеми змішувача потокового типу сипких компонентів проводилося з урахуванням проведеного аналізу літературних даних щодо різноманіття конструкцій, принципів та способів реалізації технологічного процесу змішування. Відповідно до загальноприйнятих методик патентно-інформаційних досліджень і ДСТУ 3575-97 «Патентні дослідження. Основні положення та порядок проведення».

В основу розробки аналітичної моделі процесу переміщення сипких компонентів покладені теоретичні дослідження, які зводяться до визначення системи диференціальних рівняння руху частинки в повітряному потоці під дією поверхонь робочих органів розробленого змішувач. Дану систему рівнянь отримано з використанням основних положень теорій класичної механіки, газодинаміки, теорії пружності і механіки контактної взаємодії.

Чисельне моделювання процесу роботи змішувача потокового типу здійснювались з використанням програмних пакетів STAR-CCM+ (США) та Mathematica (США). Програмний пакет STAR-CCM+ (США) для вирішення поставленої задачі використовує методи чисельного моделювання, які базуються на моделях  $k$ - $\epsilon$  турбулентності розділеної течії, поля сили тяжіння, реального газу Ван-дер-Ваальса, дискретних елементів, багатофазної взаємодії. В свою чергу в програмному пакеті Mathematica (США) з використанням математичного методу планування чисель-

ного експерименту з використанням кореляційно-регресійного аналізу, методів диференційного та інтегрального числення визначені раціональні режимно-технологічні параметри розробленого змішувача.

## 5. Результати досліджень

### 5. 1. Конструктивно-технологічна схема змішувача потокового типу

Спираючись на результати проведеного аналізу літературних даних та власних попередніх досліджень встановлено, що потоковий спосіб змішування сипких компонентів має меншу енергоємність при високій якості процесу безперервного приготування та одночасного роздавання суміші. Тому потоковий спосіб змішування зустрічних потоків сипучих компонентів (рис. 1), дозволяє одночасно виконувати змішування та видачу суміші, застосовуючи для цього лише один робочий орган. Потік першого сипучого компонента створюється за рахунок гравітаційних сил, а зустрічний потік другого сипучого компонента за допомогою обертального руху лопатевого змішувача. Надання потокам сипучих компонентів зустрічних напрямків руху дозволяє отримати високу однорідність змішування. В свою чергу, одночасне вивантаження зі змішуванням призводить до зниження енергоємності процесу через те, що робота буде виконуватись з порівняно малими об'ємами матеріалу.

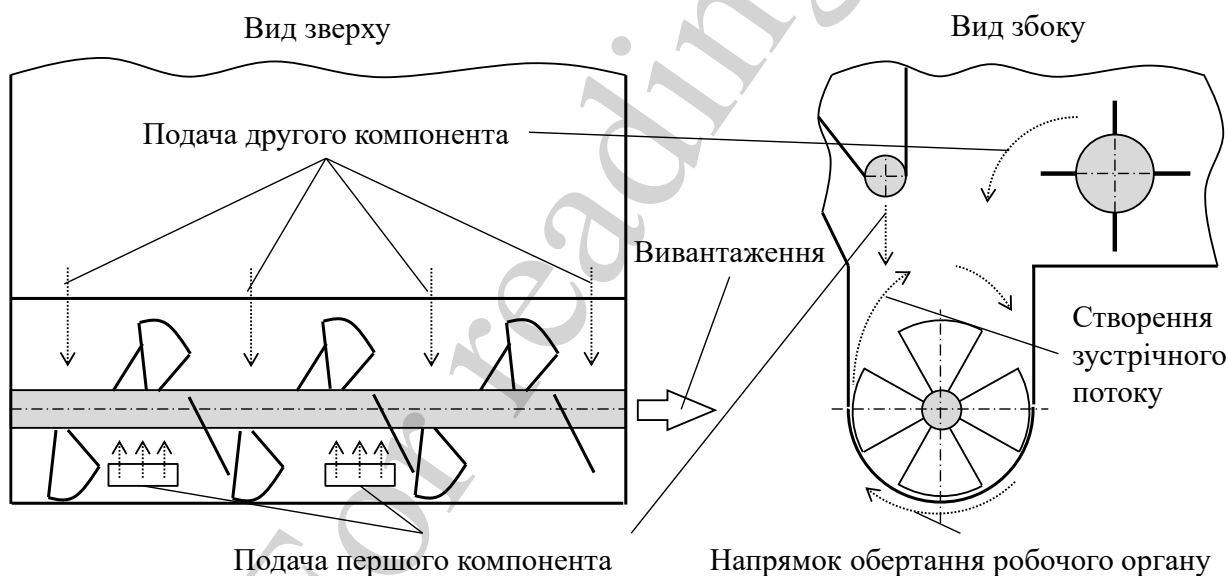


Рис. 1. Еквівалентна схема технологічного потокового процесу змішування

Також запропонована конструкція змішувача виконує зустрічне багатоступеневе змішування, адже рухаючись в напрямку вивантаження вже сформована суміш направлятиметься назустріч потокам інших компонентів, що надходять до змішувача.

## 5. 2. Аналітична модель процесу потокового змішування сипких компонентів

Розуміючи всі складнощі поставленого завдання, необхідно дослідити процес переміщення сипких компонентів під дією повітряного потоку («вентиляторний ефект») і поверхонь робочих органів розробленого змішувача.

Для дослідження процесу переміщення сипкого матеріалу під дією повітряного потоку необхідно визначити відповідний математичний апарат. Він дозволить отримати траєкторії, діаграми сил і величини ковзання при русі частинок в потоці повітря з градієнтом швидкості.

Запишемо систему диференціальних рівнянь руху однієї частинки в заданій області швидкостей потоку повітря:

$$\begin{cases} \Omega_p \cdot \rho_p \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \bar{F}, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \bar{\nabla}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\Omega_p$  – об’єм частинки,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_p$  – щільність частинки,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\bar{V}_p$  – вектор швидкості руху частинки,  $\text{м/с}$ ;  $\bar{S}_p$  – вектор переміщення частинки,  $\text{м}$ ;  $\bar{F}$  – вектор результуючої сили, що діє на частинку,  $\text{Н}$ .

Процес вирішення системи рівнянь (1) аналітичними способами є досить складним:

а) загальне число сил, що діють на частинку в повітряному потоці, є невідомим, оскільки не до кінця описані процеси, що визначають поведінку частинки в потоці;

б) аналітичні вирази для деяких сил правої частини рівняння (1) невідомі (наприклад, вираз для гідродинамічної сили повітря).

Сили, що діють на частинку при її русі в турбулентному потоці повітря, на підставі причин, що викликають їх появу, можна розділити на наступні групи [18]:

1. Сила тяжіння:

$$\bar{F}_g = \Omega_p \rho_p \bar{g}, \quad (2)$$

де  $\bar{F}_g$  – вектор сили тяжіння,  $\text{Н}$ .

2. Сила Архімеда:

$$\bar{F}_A = \Omega_p \rho_a \bar{g}, \quad (3)$$

де  $\overline{F}_A$  – вектор сили Архімеда, Н;  $\rho_a$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>.

3. Зусилля, що зумовлена зміною тиску в напрямку руху несучого потоку за рахунок його прискорення [19]:

$$\overline{F}_{ac} = \Omega_p \rho_a \frac{d_a \overline{V}_a}{dt}, \quad \frac{d_a}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \overline{V}_a \cdot \nabla, \quad (4)$$

де  $\overline{F}_{ac}$  – зусилля, що зумовлене зміною тиску, Н;  $\overline{V}_a$  – вектор швидкості руху повітря, м/с.

4. Зусилля в'язкого опору, що виникає при русі частинки з деякою відносною швидкістю в повітряному потоці [20]:

$$\overline{F}_D = \frac{1}{2} \pi D_p^2 \rho_a f_M(\text{Re}) (\overline{V}_a - \overline{V}_p) |\overline{V}_a - \overline{V}_p|, \quad (5)$$

де  $\overline{F}_D$  – зусилля в'язкого опору, Н;  $f_M(\text{Re})$  – коефіцієнт в'язкого опору.

5. Сила, еквівалентна впливу приєднаної маси представляється як

$$\overline{F}_m = \frac{1}{2} \Omega_p \rho_a \frac{d}{dt} (\overline{V}_a - \overline{V}_p) \quad (6)$$

і виражає собою зростаючу інерційність частинки при нестационарному її русі [21]. Помірне збільшення маси частинки походить від інерційності елементів середовища, яким частинка при своєму русі повинні додати додаткове прискорення. Цей додатковий рух середовища еквівалентно руху деякої фіктивної маси (приєднаної маси), яка рухається з тією ж відносною швидкістю, що і частинки.

6. Сумарна сила контактної взаємодії частинки між собою і стінкою, яка базується на пружино-демпферній контактній моделі Герца-Міндліна [22]:

$$\overline{F}_{contact} = \overline{F}_n + \overline{F}_t, \quad (7)$$

де  $\overline{F}_{contact}$  – зусилля взаємодії між частинкою і поверхнею робочого органу, Н;

$\overline{F}_n$  – нормальна складова зусилля, Н;  $\overline{F}_t$  – тангенціальна складова зусилля, Н.

Нормальна складова сили визначається наступним рівнянням:

$$\overline{F}_n = -K_n \overline{d}_n - N_n \overline{V}_n; \quad (8)$$

де  $K_n$  – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с<sup>2</sup>;

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}; \quad (9)$$

$N_n$  – нормальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{n \text{ damp}}. \quad (10)$$

Згідно досліджень [22] тангенціальна складова сили визначається, як

$$\overline{F}_t = -K_t \overline{d}_t - N_t \overline{V}_t, \quad (11)$$

якщо  $|K_t \overline{d}_t| < |N_t \overline{V}_t| C_{fs}$ , де  $C_{fs}$  – статистичний коефіцієнт тертя між частинки, або стінкою. В іншому випадку тангенціальна складова сили визначається наступним рівнянням:

$$\overline{F}_t = \frac{|K_n \overline{d}_n| C_{fs} \overline{d}_t}{|\overline{d}_t|}; \quad (12)$$

де  $K_t$  – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с<sup>2</sup>;

$$K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_t R_{eq}}; \quad (13)$$

$N_t$  – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_t = \sqrt{(5K_t M_{eq})} N_{t \text{ damp}}; \quad (14)$$

$N_{damp}$  – коефіцієнт загасання

$$N_{damp} = \frac{-\ln(C_{n \text{ rest}})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}}; \quad (15)$$

$R_{eq}$  – еквівалентний радіус двох частинок А і В, м;

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{2}{D_A} + \frac{2}{D_B}}; \quad (16)$$

$M_{eq}$  – еквівалентна маса двох частинок А і В, кг;

$$M_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}; \quad (17)$$

$E_{eq}$  – еквівалентний модуль Юнга двох частинок  $A$  і  $B$ , Па;

$$E_{eq} = \frac{1}{\frac{1 - v_A^2}{E_A} + \frac{1 - v_B^2}{E_B}}; \quad (18)$$

$G_{eq}$  – еквівалентний модуль зсуву двох частинок  $A$  і  $B$ , Па;

$$G_{eq} = \frac{1}{\frac{2(2 - v_A)(1 + v_A)}{E_A} + \frac{2(2 - v_B)(1 + v_B)}{E_B}}; \quad (19)$$

$M_A, M_B$  – маси частинок  $A$  і  $B$ , кг;  $d_n, d_t$  – віртуальне перекриття частинок  $A$  і  $B$  в нормальному і тангенціальному напрямках, м;  $D_A, D_B$  – ефективні діаметри частинок  $A$  і  $B$ , м;  $E_A, E_B$  – модулі Юнга частинок  $A$  і  $B$ , Па;  $v_A, v_B$  – коефіцієнти Пуассона частинок  $A$  і  $B$ ;  $\bar{V}_n, \bar{V}_t$  – нормальний і тангенціальний компоненти відносної швидкості поверхні частинок в точці контакту, м/с.

Для процесу взаємодії частинок зі поверхнею робочого органу залежності (16)–(19) є адекватними, однак для поверхні робочого органу приймається радіус  $D_{wall}=\infty$  і маса поверхні робочого органу  $M_{wall}=\infty$ . В результаті вирази (16) і (17) перетворюються в (20):

$$R_{eq}=D_p/2, M_{eq}=M_p. \quad (20)$$

Для подальших досліджень кінематичних і динамічних характеристик частинок при русі її в повітряному потоці приймаємо наступні припущення:

1. Частинки – жорсткі еліпсоїди із визначеним ефективним діаметром, які не відрізняються одне від одного.
2. Відсутній теплообмін між частинками і середовищем.
3. За несучий потік приймається повітряний потік, що стаціонарно рухається у зазначеній області при ізотермічних умовах.

Підставляючи (2)–(7) в (1) маємо систему диференціальних рівняння руху частинки в повітряному потоці під дією поверхонь робочих органів розробленого змішувача:



$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} &= \bar{g} + \frac{\rho_a}{\rho_p} \bar{g} + \frac{\rho_a}{\rho_p} \frac{d_a \bar{V}_a}{dt} + \frac{\rho_a}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (\bar{V}_a - \bar{V}_p) + \\ &+ \frac{\pi D_p^2 \rho_a f_M(\text{Re})}{2\Omega_p \cdot \rho_p} (\bar{V}_a - \bar{V}_p) |\bar{V}_a - \bar{V}_p| + \frac{\bar{F}_{contact}}{\Omega_p \cdot \rho_p}, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} &= \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \bar{\nabla}, \\ \bar{F}_{contact} &= \begin{cases} \bar{F}_n + \bar{F}_t, & \bar{S}_{pA} = \bar{S}_{pB}, \\ 0, & \bar{S}_{pA} \neq \bar{S}_{pB}. \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (21)$$

Рішенням системи диференційних рівнянь (21) є траєкторія польоту, вектор швидкості і прискорення частинок, що дають змогу визначити місце знаходження частинок в будь-який момент часу.

Представлена система диференційних рівнянь покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу.

### 5. 3. Чисельне моделювання процесу роботи змішувача потокового типу

Система диференційних рівнянь процесу переміщення частинок сипкого матеріалу в повітряному потоці (1) в загальному вигляді не вирішується аналітичними методами. Дослідженнями [23–25] запропоновано вирішення подібних систем методом кінцевих елементів, який реалізовано при моделюванні в CAD/CAM/CAE-системах. Сам процес моделювання може здійснюватися за допомогою різних підходів [26], але найбільше поширення в останній час отримали моделі ідеального витиснення та ідеального змішування [27, 28].

Стратегія комплексного системного аналізу фізико-механічної системи передбачає, на початковому етапі, якісний аналіз. При цьому, для процесу змішування виділяються два рівня ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ:

- сукупність фізико-механічних явищ в елементарному об'ємі (мікрорівень);
- сукупність фізико-механічних явищ в об'ємі всього апарату (макрорівень).

Серед сучасних методів комп'ютерного моделювання фізичних та технологічних процесів особливий інтерес представляють методи, що базуються на концепції дискретного представлення речовини – метод динаміки частинок і метод дискретних елементів.

Метод дискретних елементів може розглядатися як узагальнення методу кінцевих елементів. При моделюванні процесу методом кінцевих елементів задаються початкові положення, швидкості частинок і повітряного потоку. Потім, виходячи з цих початкових даних, заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються зусилля, що діють на кожен частинку в кожній інтервал часу. Для кожного окремого елемента обчислюється результуюча сила і також

вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні:  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії [29–32]. Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжових моделей багатофазного середовища. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те що частинки представляються у вигляді однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Побудову фізико-математичної моделі процесу потокового змішування сипких матеріалів виконаємо з використанням пакету програмного забезпечення StarCCM+ (рис. 2, 3). Отримана фізико-математична модель процесу потокового сипких матеріалів дозволяє визначити конструктивно-технологічні параметри змішувача потокового типу в залежності фізико-механічних властивостей компонентів при оптимальних якісних, кількісних та енергетичних показниках процесу змішування.

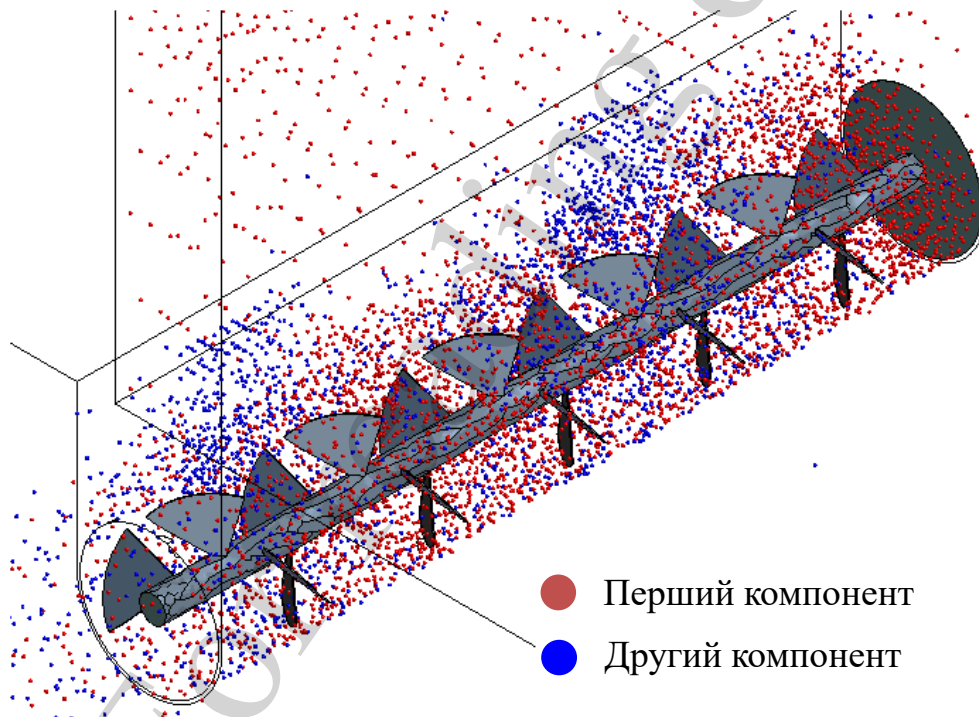


Рис. 2. 3D-моделювання процесу потокового змішування сипких компонентів змішувачем потокового типу

Для прикладу розглянемо процес змішування компонентів кормової суміші, фізико-механічні властивості яких наступні [33–35]:

- для першого компонента (стебловий корм): коефіцієнт Пуассона – 0,26; модуль Юнга – 0,8 МПа; щільність – 700 кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт тертя спокою – 0,9; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3; ефективний діаметр частинки стеблового корму – 25 мм;

– для другого компонента (концентрований корм): коефіцієнт Пуассона – 0,25; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 400 кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт тертя спокою – 0,7; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,6; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,6; коефіцієнт опору кочення – 0,5; ефективний діаметр частинки концентрованого корму – 2 мм.

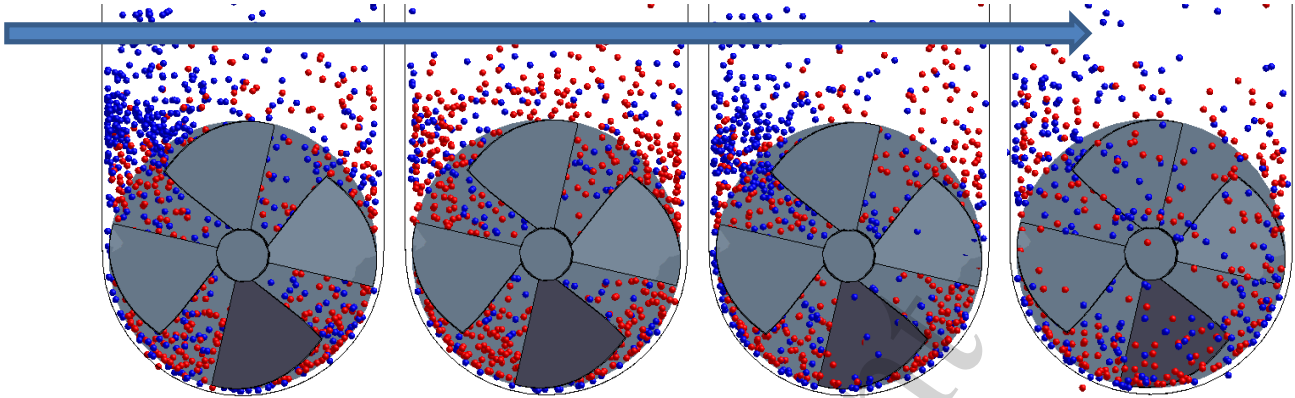


Рис. 3. Поперечні перерізи лопатевого змішувача потокового типу

Властивості середовища були наступні, що відповідають нормальним умовам [29, 32, 33]: середовище – повітря; динамічна в'язкість –  $1,85508 \cdot 10^{-5}$  Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с<sup>2</sup>; температура – 293 К; тиск – 101325 Па. Розмір комірки сітки моделювання склав 0,001 м.

Для проведення теоретичного моделювання процесу потокового змішування були прийняті наступні конструктивні параметри змішувача потокового типу (рис. 4):

- кількість вивантажувальних вікон другого компонента – 2 шт;
- довжина вивантажувальних вікон – 250 мм;
- ширина вивантажувальних вікон – 60 мм;
- довжина лопатевого змішувача – 2000 мм;
- діаметр лопатевого змішувача – 400 мм.

Моделювання проводилося згідно з прийнятим повнофакторним планом експерименту (81 дослід), який дозволяє визначати рівняння регресії другого порядку [30–32]. За фактори було прийнято частоту обертів змішувача ( $n$ ), кут атаки лопатей змішувача ( $\alpha$ ), продуктивність подачі першого компонента ( $Q_1$ ), продуктивність подачі другого компонента ( $Q_2$ ). Рівні та значення факторів теоретичних досліджень приведені в табл. 1.

За критерії оптимізації прийнято однорідність суміші  $\theta$  та концентрацію першого компонента в суміші  $C_1$ .

Слід зазначити, що змішувач був поділений на 10 зон (рис. 5), в кожній з яких визначались вищезазначені критерії оптимізації. Це дало змогу спостерігати динаміку процесу змішування компонентів.

Таблиця 1  
Фактори теоретичних досліджень

Рівень варіації фактора	Фактор			
	Частота обертів змішувача $n$ , об/хв	Кут атаки лопатей змішувача $\alpha$ , °	Продуктивність подачі першого компоненту $Q_1$ , т/год	Продуктивність подачі другого компоненту $Q_2$ , т/год
Верхній рівень (+)	250	65	24	4,8
Основний рівень (0)	175	45	18	4,2
Нижній рівень (–)	100	25	12	3,6
Інтервал варіації	75	20	6	0,6

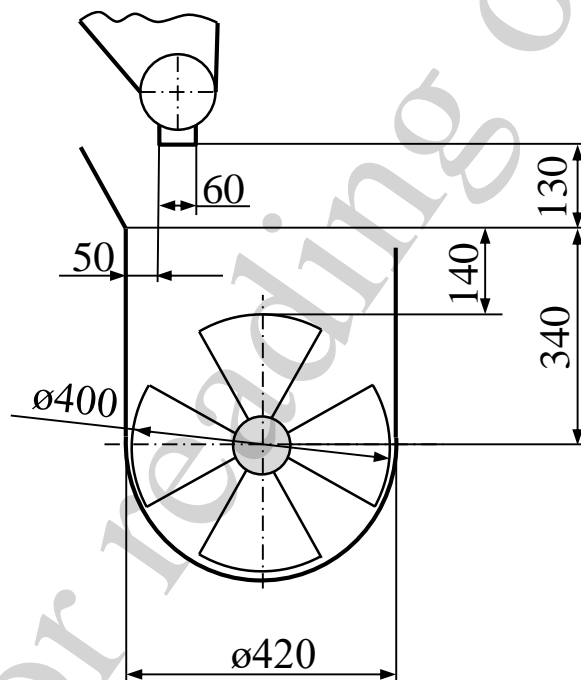


Рис. 4. Конструктивні параметри змішувача потокового типу

Однорідність суміші  $\theta$  визначається за формулою:

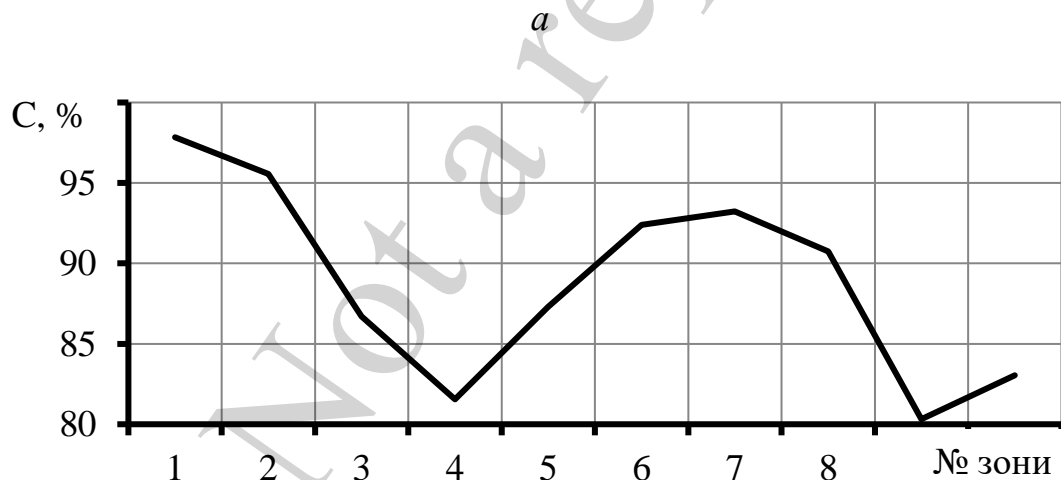
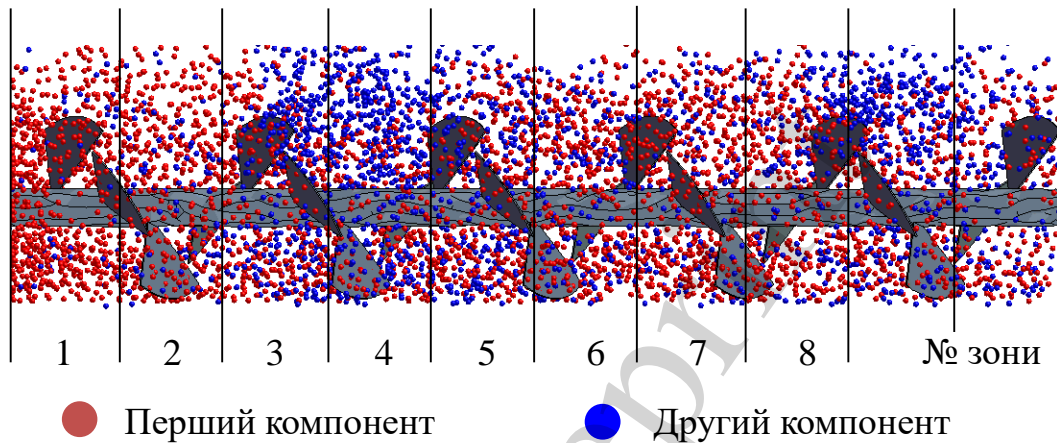
$$\theta = 1 - \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n - 1}}, \% \quad (22)$$

де  $C_0$  – задана концентрація першого компонента в суміші, %:

$$C_0 = 100 \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}, \quad (23)$$

$C_i$  – концентрація першого компонента в  $i$ -ой зоні змішувача, %;  $n$  – кількість зон змішувача.

Для кожного з дослідів, згідно плану чисельного експерименту, було отримано залежності однорідності суміші  $\theta$  та концентрації першого компонента в суміші  $C_1$  для кожної зони змішувача. Результати дослідів для основних рівнів варіювання факторів представлені на рис. 5.



б

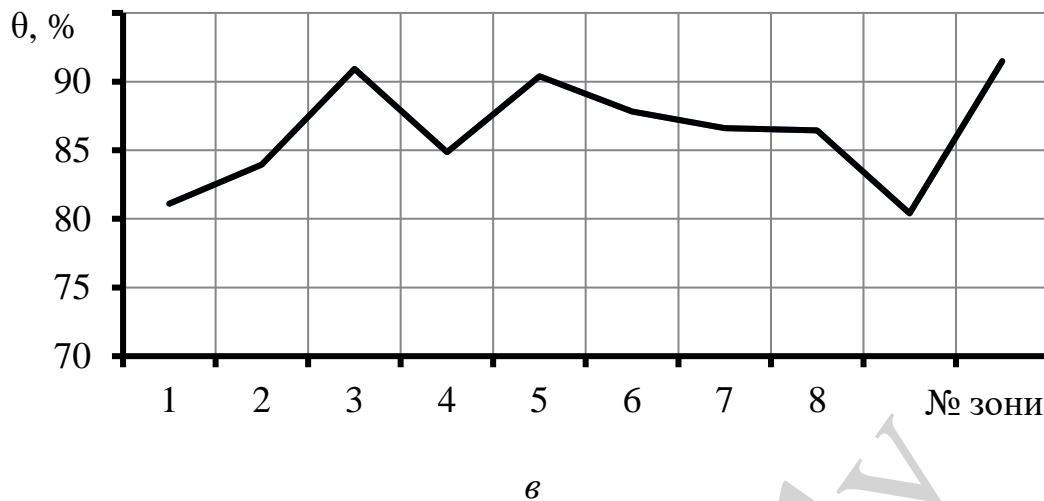


Рис. 5. Результати чисельного моделювання для кожної зони змішувача потокового типу при  $n=175$  об/хв,  $\alpha=45^\circ$ ,  $Q_1=18$  т/год,  $Q_2=4,2$  т/год: *a* – графічна візуалізація процесу змішування сипких компонентів; *б* – залежність однорідності суміші  $\theta$ ; *в* – концентрації першого компонента в суміші  $C_1$

За результатами моделювання та подальшій обробці даних в програмному пакеті Mathematica (США) з використанням функції «NonlinearModelFit» було отримано регресійну модель процесу потокового змішування кормових компонентів змішувачем-кормороздавачем, яка має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta = & -8,62329 + 0,14057n - 0,0003746n^2 + \\ & + 1,34766Q_1 - 0,0311957Q_1^2 + 29,9269Q_2 - \\ & - 3,4718Q_2^2 + 0,414694\alpha - 0,00400284\alpha^2. \end{aligned} \quad (24)$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ( $R=0,97$ ) та критерію Стюдента  $t_{0,05}(81)=1,99$  незначущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти попарної взаємодії факторів. Вплив досліджуваних факторів на однорідність змішування сипких компонентів представлено на рис. 6, 7.

Відповідно, для максимального значення однорідності суміші, яке становило 94,35 %, було отримано оптимальні параметри досліджуваних факторів, а саме: частоти обертів змішувача – 187,6 об/хв; кута атаки лопатей змішувача –  $51,8^\circ$ ; продуктивності подачі першого компонента – 21,6 т/год; продуктивності подачі другого компонента – 4,31 т/год.



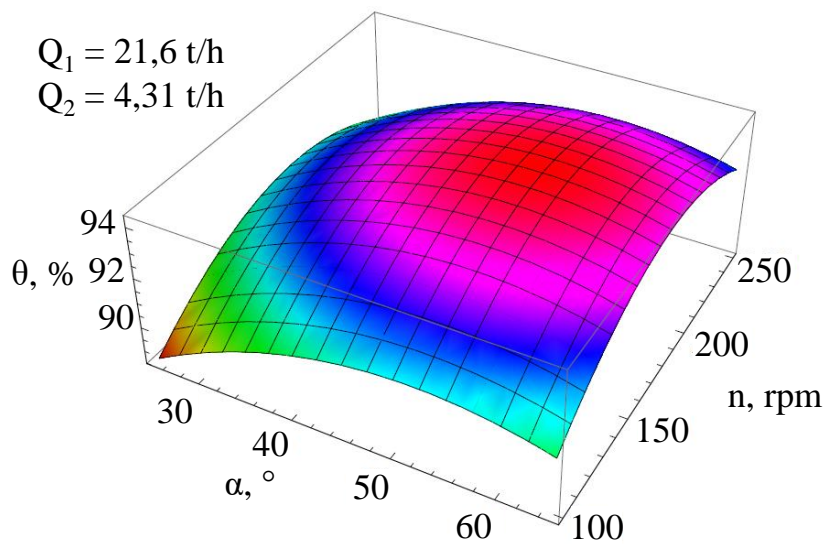


Рис. 6. Залежність однорідності суміші  $\theta$  від частоти обертів  $n$  і кута атаки  $\alpha$  лопатевого змішувача

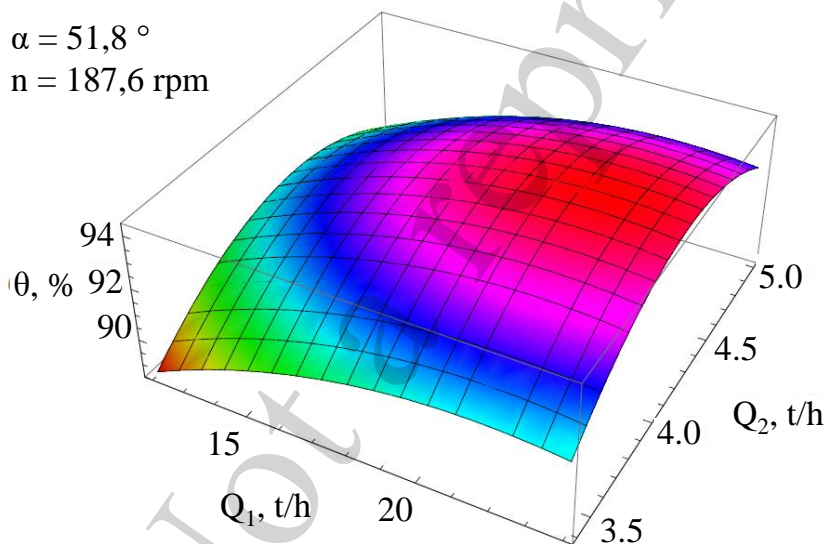


Рис. 7. Залежність однорідності суміші  $\theta$  від продуктивності подачі першого  $Q_1$  і другого  $Q_2$  компонентів

## 5. Обговорення результатів чисельного моделювання процесу роботи змішувача потокового типу

В зв'язку з тим, що сипкий матеріал представляється як система частинок невеликих розмірів необхідним є визначення їх місцезнаходження в будь-який момент часу. Переміщення даних частинок відбувається за рахунок створеного потоку повітря лопатевим робочим органом, сили гравітації і безпосередньої контактної взаємодії їх із поверхнею робочого органу та між собою. Складені рівняння (1)–(21) дають змогу визначати траєкторії руху частинок, їх швидкості і прискорення. Вони складають основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу.

При чисельному моделюванні процесу потокового змішування методом кінцевих елементів задаються початкові положення, швидкості частинок і повітряного потоку. Окрім цього визначаються граничні умови розробленого змішувача. Потім, виходячи з цих початкових даних, заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються зусилля, що діють на кожну насінину в кожний інтервал часу. Для кожної частинки обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. Дана методика покладена в основу пакету програмного забезпечення StarCCM+.

В результаті чисельного моделювання визначені залежності динаміки зміни концентрації компонентів в суміші та однорідності суміші від зон змішувача потокового типу в залежності від факторів досліджень (частота обертів  $n$ , кут атаки  $\alpha$  лопатевого змішувача, продуктивність подачі першого  $Q_1$  і другого  $Q_2$  компонентів). Як видно з рис. 5, для кожного фактору досліджень спостерігається оптимальне значення. Це пояснюється тим, що при надмірному збільшенні значень факторів досліджень спостерігається явище сегрегації суміші, що призводить до погіршенню її однорідності.

Викладені методичні аспекти і представлені результати досліджень можуть бути використані для визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів змішувача потокового типу будь-яких сипких компонентів, ефективний діаметр частинок яких не перевищує 30 мм. При цьому критерієм оцінки процесу є однорідність суміші при визначених показниках продуктивності.

Можливим шляхом подальшого розвитку наведених досліджень є розробка програмного забезпечення, що дозволить в автоматичному режимі проводити моделювання процесу потокового змішування сипких компонентів різних типів. Це значно розширить область застосування наведених моделей.

## 7. Висновки

1. На основі проведеного аналізу способів та технічних засобів для змішування сипких компонентів запропоновано конструктивно-технологічну схему змішувача потокового типу, яка дозволяє одночасно виконувати змішування та видачу суміші, застосовуючи для цього один лопатевий робочий орган.

2. В результаті аналітичних досліджень потокового способу змішування складено систему диференціальних рівнянь руху частинок компонентів сипкого матеріалу в повітряному потоці під дією поверхонь робочих органів розробленого змішувача, що дає змогу визначити місце знаходження частинок в будь-який момент часу. Представлена система диференціальних рівняння покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу в пакеті програмного забезпечення StarCCM+.

3. В результаті чисельного моделювання отримані залежності динаміки зміни концентрації компонентів в суміші та однорідності суміші від зон змішувача потокового типу в залежності від частоти обертів  $n$ , кута атаки  $\alpha$  лопатевого змішувача та продуктивності подачі першого  $Q_1$  і другого  $Q_2$  компонентів. Для процесу змішування двокомпонентної кормової суміші (стебловий і концентрований корми) визначені оптимальні конструктивно-технологічні параметри



змішувача потокового типу при яких однорідність кормосуміші є максимальною (94,35 %), а саме: частота обертів змішувача – 187,6 об/хв.; кут атаки лопатей змішувача – 51,8°; продуктивність подачі стеблового корму – 21,6 т/год; продуктивність подачі концентрованого корму – 4,31 т/год.

### Література

1. Fazekas, S. (2007). Distinct Element Simulations of Granular Materials. Budapest, 144. URL: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/602/ertekezes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. Holdich, R. (2002). Fundamentals of Particle Technology. Midland Information Technology and Publishing, 173. URL: [https://www.researchgate.net/publication/255700879\\_Fundamentals\\_of\\_Particle\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/255700879_Fundamentals_of_Particle_Technology)
3. Alenzi, A. F. (2012). Modeling of consolidation and flow of granular material under varying conditions. University of Pittsburgh, 144. URL: <http://d-scholarship.pitt.edu/id/eprint/13172>
4. Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M. (2015). Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. Powder Technology, 283, 32–47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.016>
5. Abbaspour-Fard, M. H. (2000). Discrete element modelling of the dynamic behaviour of non-spherical particulate materials. University of Newcastle upon Tyne, 275. URL: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.324869>
6. Naeini, M. S. E. (2011). Discrete Element Modeling of Granular Flows in Vibrationally-Fluidized Beds. University of Toronto, 130. URL: [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/29716/17/EmamiNaeini\\_MohammadSaeid\\_201106\\_PhD\\_thesis.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/29716/17/EmamiNaeini_MohammadSaeid_201106_PhD_thesis.pdf)
7. Кольман-Иванов, Э. Э., Гусев, Ю. И., Карасев, И. Н. и др. (1985) Конструирование и расчет машин химических производств. М.: Машиностроение, 228–254. URL: <https://www.twirpx.com/file/149553/>
8. Верлока, И. И., Капранова, А. Б., Лебедев, А. Е. (2014). Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов. Инженерный вестник Дона, 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-gravitatsionnye-ustroystva-nepreryvnogo-deystviya-dlya-smeshivaniya-sypuchih-komponentov>
9. Мизонов, В. Е., Балагуров И. А. (2016). Теоретические основы моделирования и расчета формирования многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов. Иваново: ИГЭУ, 108.
10. Макаров, Ю. И. (1973). Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 216. URL: <https://www.twirpx.com/file/1317803/>
11. Селиванов, Ю. Т., Першин, В. Ф. (2004). Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М.: «Издательство машиностроение-1», 120. URL: <https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2004/selivan.pdf>
12. Шубин, И. Н., Свиридов, М. М., Таров, В. П. (2005). Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 76.

13. Першин, В. Ф., Однолько, В. Г., Першина, С. В. (2009). Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 220.
14. Weinekötter, R. (2016). Mixing of Solid Materials. Production, Handling and Characterization of Particulate Materials, 291–326. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4_9)
15. Delaney, G. W., Cleary, P. W., Hilden, M., Morrison, R. D. (2009). Validation of dem predictions of granular flow and separation efficiency for a horizontal laboratory scale wire mesh screen. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. Melbourne. URL: <https://www.researchgate.net/publication/43517493>
16. Herrmann, H. J. (1993). Molecular dynamics simulations of granular materials. International Journal of Modern Physics C, 04 (02), 309–316. doi: <https://doi.org/10.1142/s012918319300032x>
17. Ferrara, G., Preti, U., Schena, G. D. (1987). Computer-aided Use of a Screening Process Model. APCOM 87. Proceeding of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries. Vol. 2: Metallurgy. Johannesburg, 153–166. URL: <https://www.saimm.co.za/Conferences/Apcom87Metallurgy/153-Ferrara.pdf>
18. Dinesh, J. (2009). Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Bangalore. URL: <https://www.comsol.com/paper/download/46302/Jamnani.pdf>
19. Kanehl, P. (2010). Particle model of the Magnus effect. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 35. URL: [https://physik.uni-greifswald.de/storages/uni-greifswald/fakultaet/mnf/physik/ag\\_schneider/Arbeiten/philippBA.pdf](https://physik.uni-greifswald.de/storages/uni-greifswald/fakultaet/mnf/physik/ag_schneider/Arbeiten/philippBA.pdf)
20. Chen, N. H. (1979). An Explicit Equation for Friction Factor in Pipe. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 18 (3), 296–297. doi: <https://doi.org/10.1021/i160071a019>
21. Zhang, S., Kuwabara, S., Suzuki, T., Kawano, Y., Morita, K., Fukuda, K. (2009). Simulation of solid–fluid mixture flow using moving particle methods. Journal of Computational Physics, 228 (7), 2552–2565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.12.005>
22. Di Renzo, A., Di Maio, F. P. (2004). Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. Chemical Engineering Science, 59 (3), 525–541. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>
23. Broas, P. (2001). Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. VTT Technical Research Centre of Finland, 73–81.
24. Han, S. W., Lee, W. J., Lee, S. J. (2012). Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. World Academy of Science, Engineering and Technology, 6 (7), 386–390.
25. Satish, G., Ashok Kumar, K., Vara Prasad, V., Pasha, Sk. M. (2013). Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 2 (12), 41–45. URL: <https://www.researchgate.net/publication/>

# 334761930\_COMPARISON\_OF\_FLOW\_ANALYSIS\_OF\_A\_SUDDEN\_AND\_GRADUAL\_CHANGE\_OF\_PIPE\_DIAMETER\_USING\_FLUENT\_SOFTWARE

26. Iguchi, M., Ilegbusi, O. J. (2014). Basic Transport Phenomena in Materials Engineering. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54020-5>

27. Иванец, В. Н., Бакин, И. А., Белоусов, Г. Н. (2002). Энтропийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов. Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья, 11, 16–18.

28. Бакин, И. А., Белоусов, Г. Н., Саблинский, А. И. (2001). Моделирование процесса смешивания энтропийно – информационным методом. Новые технологии в научных исследованиях в образовании. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 1. Юрга.

29. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH, 54 (1), 95–104. URL: [http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat\\_2.pdf](http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat_2.pdf)

30. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. INMATEH, 54 (1), 129–138. URL: [http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat\\_3.pdf](http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat_3.pdf)

31. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. INMATEH, 56 (3), 119–128. URL: [http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat\\_15.pdf](http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat_15.pdf)

32. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. Acta Periodica Technologica, 50, 12–22. doi: <https://doi.org/10.2298/apt1950012a>

33. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., Гаврильченко, О. С., Івлєв, В. В. (2019). Моделювання процесу сепарації сипкого матеріалу залежно від його фізико-механічних властивостей. Вісник аграрної науки Причорномор'я, 4, 114–121. URL: <https://visnyk.mnau.edu.ua/statti/2019/n104/n104v4r2019aliev.pdf>

34. Коптев, А. А., Першин, В. Ф., Свиридов, М. М., Таров, В. П., Шубин, И. Н. (2001). Особенности определения углов внутреннего трения сыпучих материалов. Вестник Тамбовского государственного технического университета, 7 (1), 60–65.

35. Купченко, А. В., Ялпачик, О. В., Шпиганович, Т. А., Алексеенко, В. А. (2010). Определение прочностных характеристик зерна. Зернові продукти і комбікорми, 4, 18–22.